

Effect of Winter Crop Cultivation on Soil Organic Carbon and Physico-chemical Properties Under Different Rice-forage Cropping Systems in Paddy Soil

Sun-Gang Yun, Chang-Hoon Lee*, Byong-Gu Ko, Seong-Jin Park, Myung-Sook Kim, and Ki-Yong Kim¹

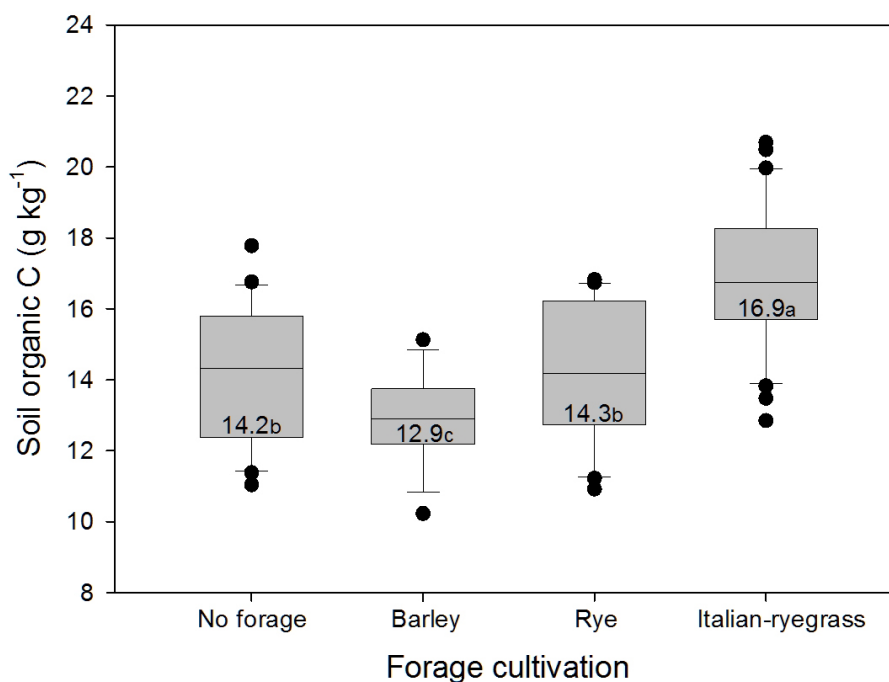
Soil and Fertilizer Division, National Institute of Agricultural Science, RDA, Wanju 55365, Rep. of Korea

¹Grassland and Forage Crop Division, National Institute of Animal Science, RDA, Seongwhan 31000, Rep. of Korea

(Received: July 5 2016, Revised: August 17 2016, Accepted: August 22 2016)

Soil organic carbon plays an important role on soil physico-chemical properties and crop yields in paddy soil. However, there is little information on the soil organic carbon under different forage cultivation during winter season in rice paddy. In this study, we investigated the soil organic carbon and physico-chemical properties in 87 fields of paddy soil cultivated with Barley, rye, and Italian ryegrass (IRG) as animal feedstock during winter season. Organic carbon was 12.9, 14.3, and 16.9 g C kg⁻¹ in soil with barley, rye, and IRG cultivation, respectively. Among rice-forage cultivation systems, the rice+IRG cropping system was 19.5% higher than in the mono-rice cultivation. Bulk density ranged from 1.17 to 1.28 g cm⁻³ irrespective of cropping systems, and had strongly negative correlation with the soil organic carbon in the rice+IRG cropping system. Carbon storage in rice+IRG cropping systems was average 29.6 Mg ha⁻¹ at 15 cm of soil depth, which was 20.4 and 10.3% higher than those of barley and rye cultivation. Increasing carbon storage in paddy soil contributed to the fertility for following rice cultivation. This results indicated that IRG cultivation during winter season could be an alternative and promising way to enhance soil organic carbon content and fertility of paddy soil.

Key words: Cropping system, Forage, Soil organic carbon, Italian-ryegrass



Distribution of soil organic carbon contents under rice-forage cropping system in paddy soil.

*Corresponding author: Phone: +82632382453, Fax: +82632383822, E-mail: chlee915@korea.kr

[§]Acknowledgement: This study was supported by research project of National Institute of Agricultural Science (PJ010516032016), Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

토양유기물의 분해는 작물생산과 환경보전에 중요한 역할을 한다. 토양유기물은 직·간접으로 작물생육에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Bongiovanni and Lobartini, 2006). 토양유기물과 연계된 입단의 안정성과 구조발달은 근권의 신장을 도모하고 (Tisdall and Oades, 1982; Senesi and Loffredo, 1999), 수분보유력을 향상시키며 (Smith et al., 1985), 토양침식에 의한 토양의 유실을 저감시킨다 (Schjonning and Christensen, 1994). 또한 토양유기물은 완충용량 및 양이온치환용량을 증가시키고 (Lee et al., 2009), 작물이 흡수하는 양분의 유효도를 향상시켜 궁극적으로 작물생산성을 증가시킨다 (Lee et al., 2008). 또한 작물생산성의 증대는 지상부와 지하부 작물체량에 증가에 영향을 줄 수 있으며, 광합성을 통해 대기로부터 이산화탄소의 고정 용량이 증가되어 지구온난화 완화에도 기여할 수 있다 (Luyssaert et al., 2008). 그러므로 농경지의 지속적인 생산과 환경보전을 위해서 토양유기물 관리가 필요하다.

논토양은 식량작물인 벼가 생육하는 장소이며, 벼짚과 같은 유용한 유기물이 발생하는 곳이다. 집약적인 벼 재배를 위한 지속적인 화학비료의 시비는 토양유기물을 점진적으로 감소시키는 것으로 알려져 있기 때문에 (Lee et al., 2009), 안정적인 벼 생산을 위해 논토양에 유기물 투입이 필수적이다. 벼 수확 후에 논토양에 벼짚환원이 현실적인 토양유기물 관리 대책이 될 수 있으나, 대부분의 벼짚을 가축사료로 사용하고 있어 논토양에 벼짚의 환원이 어려운 상황이다. 그러나 벼짚을 제거하더라도 잔존그루티기는 토양유기물 공급원이 될 수 있다 (Sanchez et al., 1989; Palm et al., 1997). 예를 들어, 수확기 벼와 조사료의 그루티기는 토양의 탄소 및 질소 등 양분공급에 상당한 영향을 미치며 (Kim et al., 2013), 벼-동계맥류 재배는 토양유기물의 증가를 가져온다 (Yang et al., 2007). 집약농업에서 작물의

잔재물은 토양유기물과 양분공급에 효과를 가질 수 있다.

겨울철 논에 작물 재배는 농업적 활용성 측면에서 장·단점을 가진다. 최근 가축사료를 확보하기 위해 논에서 벼짚을 수거하고 있는데, 조사료 재배는 벼짚 이외에 가축사료를 확보하는 장점을 가지나, 추가적인 유기물 사용 없이 지속적으로 벼짚과 조사료의 제거는 논토양의 유기물을 감소시킬 수 있다. 그러나 벼-조사료 작부체계에 따른 토양유기물 함량에 대한 연구는 여전히 부족한 실정이다. 본 연구에서는 벼-조사료 작부체계에 따른 토양유기물과 이와 관련된 토양특성을 조사하였고, 이를 통해 논토양의 토양관리를 위한 합리적인 벼-조사료를 작부체계를 선발하고자 하였다.

Materials and Methods

조사료 경종관리 겨울철 논에 조사료 재배를 위한 경종관리는 Table 1과 같으며, 4~5년 이상 동일하게 경종형태로 관리된 농가 필지를 대상으로 하였다. 조사된 농가의 필지 (87)필지에서 조사료 파종은 이탈리아라이그라스 (IRG)는 9월 중순, 청보리와 호밀은 10월 중순과 10월말, 그리고 늦게까지는 11월말까지 이루어졌고, 파종량은 청보리와 호밀은 각각 180~200 kg ha⁻¹, IRG는 40 kg ha⁻¹이었다. 비료는 복합비료를 200~300 kg ha⁻¹, 그리고 추비는 대부분 요소를 사용하여 150~300 kg ha⁻¹을 사용하고 있었다. 조사료 수확은 5월 중순에서 6월 초순에 마쳤으며 수확량은 사일리지로 30~38.6 롤 ha⁻¹ 수준이었다. 이때 사일리지 1롤의 무게는 400~600 kg이었다. 조사료 수확 10일 이후에 벼 이앙을 하였고, 벼 분얼기 및 출수기의 생육상황에 따라 경험적으로 요소를 시비하였고, 벼 수확기의 벼짚 수확량은 대략 30~40롤 ha⁻¹이었다.

토양채취 및 분석 벼 단작, 그리고 벼와 조사료를 재배하고 있는 거창, 김제, 영광, 장흥, 진주, 함양, 함평, 화

Table 1. Farming practices for forage cultivation in paddy soil.

Forage cultivation practices	Forage		
	Barley (n = 13)	Rye (n = 20)	Italian-ryegrass (IRG) (n = 32)
Sowing seed			
Date (mm/dd)	9.10~10.10.	9.30~10.30.	9.10.~9.20.
Rate (kg ha ⁻¹)	180~200	200	40
Fertilization			
Composite fertilizer (kg ha ⁻¹)	300	200	300
Addition (kg ha ⁻¹)	150	300	150
Harvesting			
Date (mm/dd)	5.1.~5.10.	5.15.~6.10.	5.1.~5.10.
Productivity (roll ha ⁻¹)	30	38.6	37.5

Note) Weight of one roll was 400~600 kg after harvesting. n is sampling number.

순 지역의 87 필지를 대상으로 2015년 3월~4월 기간에 토양 깊이 15 cm로 토양시료를 채취하였다. 이때, 벼를 단작으로 재배하는 논은 22 필지, 겨울철 조사료를 재배하는 논은 총 65 필지로 각각 청보리는 13, 호밀은 20, 그리고 IRG는 32 필지이었다. 토양의 3상, 용적밀도 및 공극률 산정을 위하여 코어 (지름 7.5 cm, 높이 6 cm) 샘플러를 이용하여 토양 깊이 0~15 cm에서 토양시료를 채취하였고, 105°C에서 48시간동안 건조하여 조사하였다. 오거로 채취한 토양시료는 풍건 및 분쇄하였고, 2 mm 체를 통과한 토양시료를 화학적 특성분석에 이용하였다. 조사료 수확시기인 5월 15일 경에 호밀, 청보리, 이탈리아라이그라스를 재배하는 3지점에서 60 cm × 60 cm 격자를 이용하여, 토양깊이 30 cm까지 그루터기를 채취하였다. 이때, 1 mm 체 위에서 토양을 제거한 다음 1 mm 체 위의 잔존물을 80°C에서 48시간 건조하였다. 이후 건조 무게를 측정하고 다음에 곱게 분쇄하여 원소분석기 (Vario max CNS, Elementar)로 전탄소 (TC)와 전질소 (TN) 함량을 측정하였다.

토양 pH는 토양과 증류수를 1:5로 교반하여 pH meter로 측정하였다. 토양유기탄소 (SOC) 함량은 막자사발로 곱게 분쇄하여 Tyurin법으로 정량하였다. 그리고 유기물함량 (OM)은 SOC 함량에 1.724를 곱하여 산정하였다. 유효인산은 Lancaster 법으로 720 nm에서 정량하였고, 치환성양이온은 1N-ammonium acetate 용액 (pH 7.0)으로 침출하여 ICP로 K, Ca, Mg 농도를 측정하여 구하였다. 무기태 질소는 2M KCl로 침출하였고, 용액 중 $\text{NH}_4\text{-N}$ 과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 함량을 질소 자동분석기 (BLAN-LUEBEBE)로 구하였다. 조사료 재배에 따른 탄소저장량 산정은 아래와 같이 구하였다.

$$\text{SOC}(\text{Mg C ha}^{-1}) = \sum_1^n D \times C \times L \times 0.1$$

여기서, D는 코어의 용적밀도 (g cm^{-3}), C는 토양유기탄소 함량 (g C kg^{-1}), L은 토양깊이를 의미하며, 토양깊이는 15 cm로 고정하였다. 단위환산을 위해 0.1을 곱하였다.

통계 분석 SAS 9.2를 이용하여 통계분석을 실시하였다. 벼 단작과 이모작 (벼-조사료)재배지의 평균은 유의수준 5%에서 t-검정으로 비교하였다. 조사료 종류에 따른 모든 데이터는 분산분석 이후에 Duncan ($\alpha=0.05$)검정을 처리 평균을 비교하였다.

Results and Discussion

토양유기탄소 함량 논토양에서 겨울철 조사료를 재배하는 65필지 (이모작)와 조사료를 재배하지 않는 22필지 (벼 단작)간에 SOC 함량을 비교하였다. 논토양의 평균 SOC

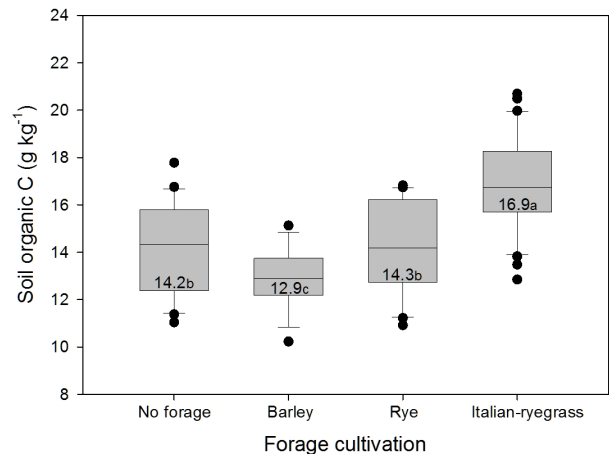


Fig 1. Distribution of soil organic carbon contents under rice-forage cropping system in paddy soil.

함량은 벼 단작이 14.2 g kg^{-1} , 벼-조사료 작부체계인 이모작은 평균 15.3 g kg^{-1} 으로 벼 단작에 비해 약 7.7% 높았다 ($p < 0.05$). Fig. 1에 겨울철 청보리, 호밀, 이탈리아라이그라스 (IRG)를 재배해 온 논토양의 SOC 함량을 나타내었다. 벼 후작으로 청보리, 호밀, IRG를 재배한 논토양의 평균 SOC 함량은 각각 12.9 , 14.3 , 16.9 g kg^{-1} 으로 벼+IRG 작부체계의 평균 SOC 함량이 가장 많았다. 벼 단작의 평균 SOC 함량인 14.2 g kg^{-1} 과 비교할 때, 벼+IRG 작부체계는 SOC 함량을 19% 높였다고 볼 수 있다. 그러나 벼+청보리 작부체계에서 평균 SOC함량은 벼 단작에 비해 10% 낮았고, 벼+호밀 작부체계는 벼 단작의 평균 SOC 함량과는 차이를 나타내지 않았다 ($p < 0.05$).

겨울철 동안에 벼 후작으로 재배한 청보리, 호밀, IRG 수확시기인 5월 중순에 논토양에 남아 있는 그루터기 (수확 후 남은 식물체 밑 부분과 뿌리 포함) 특성을 조사하였는데 (Table 2), 그루터기 양은 호밀이 6.86 Mg ha^{-1} 로 가장 많았고, IRG와 청보리는 약 6.0 Mg ha^{-1} 으로 비슷하였다. 그러나 그루터기에 포함된 전탄소 (TC) 함량은 IRG가 264.5 g kg^{-1} 으로 가장 높았고, 청보리와 호밀은 각각 257.3 , 241.6 g kg^{-1} 으로 IRG의 TC 함량에 비해 2.7, 9.5% 낮았고, 그루터기의 C/N 비는 IGR가 34.9으로 청보리와 호밀에 비해 20.7, 5.1% 더 높았다. Fig. 1과 같이, 벼+IRG 작부체계에서 논토양으로부터 벚짚 및 IRG를 전량 조사료로 활용하더라도 토양 중 SOC 함량이 가장 높았다. 이는 벼+IRG 작부체계에서 잔존 그루터기의 TC 함량이 평균 SOC 함량을 높였던 것으로 판단된다.

토양 물리적 특성 토양 중 유기물은 입단형성 및 안정성을 향상시키고, 유기물의 분해로 양분순환 및 작물에 양분 공급량을 많게 한다 (Nicholson et al., 1996; Bongiovanni and Lobartini, 2006). 특히, 조사료 수확 후에 토양에 남겨진 그루터기로 공급되는 탄소 및 질소는 토양의 이화학성에

Table 2. Characteristics of stubble in paddy soil after forage harvest under rice forage cropping system in paddy soil.

Forage	Stubble mass (Mg ha ⁻¹)	TC (g kg ⁻¹)	TN (g kg ⁻¹)	C/N ratio	C and N supply	
					C (kg ha ⁻¹)	N (kg ha ⁻¹)
Barley	6.05	241.6	8.36	28.9	1,459	69.9
Rye	6.86	257.3	7.90	33.2	1,754	64.9
IRG	5.99	264.5	7.55	34.9	1,610	57.5

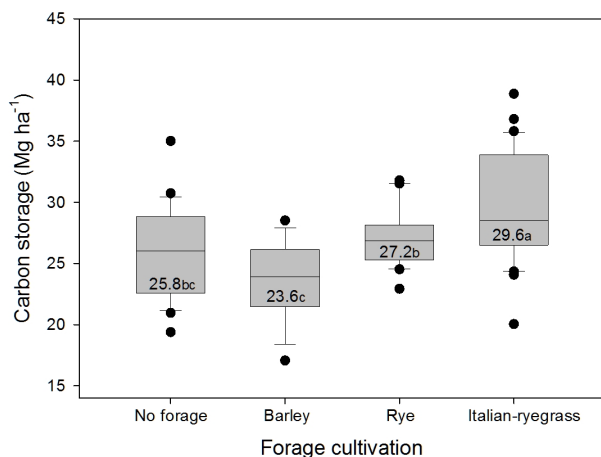
Table 3. Physical properties of paddy soil under rice-forage cropping system.

Cropping system	Bulk density (g cm ⁻³)	3 phase			Porosity
		Solid	Liquid	Gas	
mono-rice	1.22 _{ab}	46.0 _{ab}	42.5 _a	11.6 _a	54.0 _{ab}
Rice-Barley	1.22 _{ab}	46.0 _{ab}	43.1 _a	10.9 _a	54.0 _{ab}
Rice-Rye	1.28 _a	48.4 _a	38.4 _b	13.2 _a	51.6 _a
Rice-IRG	1.17 _b	44.3 _b	44.9 _a	10.9 _a	55.7 _b

영향을 미칠 수 있다 (Yang et al., 2007). Table 3에서, 벼-조사료 작부체계에서 겨울철 청보리, 호밀, IRG를 재배한 논토양의 물리적 특성을 벼 단작과 비교하였다. 벼 단작에서 토양의 용적밀도는 1.22 g cm⁻³으로 벼+청보리와 벼+호밀 작부체계와는 차이가 거의 없었다. 그러나 IRG 재배지 용적밀도는 1.17 g cm⁻³으로 벼 단작에 비해 4.3% 더 낮았고 ($p < 0.05$), 벼+IRG 작부체계에서 용적밀도와 SOC 농도 간에 강한 부의상관관계가 있었다 ($p < 0.05$). 토양 중 SOC는 점토와 복합체를 이루기 때문에 토양의 입단화를 향상시키고, 특히 입단에 포함된 부분의 SOC는 분해저항성이 높아 미생물의 탄소 이용을 저해할 수 있다 (Oades, 1984; Balesdent et al., 2000). 또한 SOC에 의한 입단형성 및 안정성은 작물의 근권 등의 지하부 biomass 증가시키는데, 이는 토양 중 SOC 함량을 높이는데 기여할 수 있다 (Jenkinson et al., 1987; Saffigna et al., 1989). Fig. 1에 나타냈듯이, 벼+IRG 작부

체계에서 논토양의 SOC 함량이 증가되어 용적밀도 등의 물리적 특성이 향상된 것으로 판단된다.

가을에 파종된 조사료 작물은 월동 후에 생육이 진행되는, 생육 초기에는 단백질, 탄수화물을 비롯한 셀룰로오스와 같은 분해성이 높은 섬유소가 많으며, 생육 후기에는 분해성이 낮은 리그닌 계통의 탄소화합물이 많게 된다 (Kim et al., 2015). 토양 중 입단의 안정성은 유기물의 분해저항성을 높일 수 있기 때문에 (Balesdent et al., 2000), 조사료 수확 후에 환원된 그루터기 유기물 중 상당량은 난분해성 탄소화합물로 토양에 남게 되어 토양 탄소저장량 증진에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단한다. 논에서 벼 재배 후 겨울철에 조사료 작물을 이모작 재배하였을 때, 벼 단작과 조사료 종류별 논토양의 탄소저장량을 평가하였다 (Fig. 2). 벼 단작의 탄소저장량은 25.8 Mg ha⁻¹이었고, 조사료를 이모작으로 재배하는 벼+호밀과 벼+IRG는 각각 27.2, 29.1 Mg ha⁻¹로 벼 단작에 비해 5.1, 11.3% 높았고, 벼+청보리는 23.6 Mg ha⁻¹으로 벼 단작에 비해 약 8.5% 낮았다. 겨울철 IRG 재배는 논토양의 탄소저장에 효과가 있으므로, 농경지 유기물관리를 위한 현실적인 토양관리 대책이 될 수 있었다. 그러나 그루터기양은 파종 및 수확시기에 따라 달라질 수 있으므로 토양탄소저장에 대한 적정 파종 및 수확 시기에 대한 추가적인 연구도 필요할 것으로 사료된다.

**Fig 2. Distribution of carbon storage under rice-forage cropping system in paddy soil.**

토양 화학적 특성 토양유기물은 원충능 및 양이온치환용량 (CEC)을 높이고 작물생육을 위한 질소와 인 등의 유효도 증진에도 영향을 미친다 (Lee et al., 2004, 2009). 특히, 논토양에서 SOC 함량의 증가는 화학적 특성과 관련되어 비옥도를 향상시키고, 작물 생산성을 지속시키는 것으로 알려져 있다 (Lee et al., 2009; 2012). Table 4와 같이, 토

Table 4. Chemical properties of paddy soil under rice-forage cropping system.

Cropping system	pH	OM	Av.P ₂ O ₅	Ex. cation			Inorg. N	
				K	Ca	Mg	NH ₄ -N	NO ₃ -N
	(1:5)	(g kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	----- (cmol kg ⁻¹) -----			----- (mg kg ⁻¹) -----	
mono-rice	6.1 _{ab}	24.5 _b	130 _b	0.29 _a	4.88 _b	1.19 _b	2.8 _b	9.7 _a
Rice-Barley	6.4 _a	22.3 _c	207 _a	0.28 _a	6.12 _a	1.87 _a	9.3 _a	9.7 _a
Rice-Rye	6.0 _b	24.6 _b	179 _{ab}	0.24 _a	4.72 _b	0.61 _c	4.6 _b	7.7 _a
Rice-IRG	6.1 _{ab}	29.1 _a	121 _b	0.32 _a	4.85 _b	1.47 _{ab}	5.5 _{ab}	14.8 _a

양 중 유기물 함량은 SOC 함량과 유사한 결과를 나타내었다. 그리고 벼+청보리 작부체계를 제외하면, 벼 단작에서 pH는 6.1로 벼+호밀과 벼+IRG 작부체계의 토양 pH와는 차이가 없었다 ($p < 0.05$). 토양 pH는 무기화 및 질소와 인의 유효도 향상에 영향을 미친다. Table 4에서 벼-조사료 작부체계 중 토양 pH가 6.4로 가장 높은 벼+청보리 작부체계에서 NH₄-N과 유효인산 함량이 각각 9.3과 207 mg kg⁻¹으로 가장 높았다. 토양에 축적된 인의 유출은 수계의 부영양화에 대한 원인 물질이 될 수 있다 (Carpenter et al., 1998; Sims et al., 1998). 특히 조사료 수확 후에 담수에 의한 로터리 등의 경종활동은 벼 이앙기에 논으로부터 가용성 인의 유출량이 높아진다 (Lee et al., 2011). 따라서 논에 조사료-벼 재배에 따른 인 유출을 저감할 수 있는 합리적인 대안 마련이 필요하겠다.

토양 pH는 치환성 Ca와 Mg 함량과 관련이 있으며 (Lee et al., 2008), 토양 중 Ca와 Mg로 유도되는 수산화이온 (OH⁻)은 토양 중 수소이온 (H⁺) 농도를 감소시켜 pH를 높일 수 있다 (Dampney, 1985; Tang et al., 2003). 또한 토양 pH의 증가는 microbial biomass 및 효소활성을 촉진시키고, 이는 토양 중 질소 및 인 유효도가 향상될 수 있다 (Cookson, 1999; Tate, 2000; Lee et al., 2008). 무기태 인은 산성토양에서 Al-P와 Fe-P로 강하게 흡착되지만, 염기성 토양에서는 Ca-P로 침전된다 (Fixen et al., 1983; Stout et al., 2000). 토양 pH가 높아짐에 따라 토양 중 Al과 Fe 결합에 비해 상대적으로 약한 Ca-P 결합으로 유효인산함량은 증가된다 (Dean, 1949; Bohn et al., 1985). 그러나 토양 중 양분유효도는 유기물 특성 및 이용하는 양에 의해 달라지게 때문에 (Haque et al., 2013; Kim et al., 2013), 추가적인 조사가 필요한 것으로 판단된다.

Conclusion

벼-조사료 작부체계에서 조사료 종류가 토양유기물에 미치는 영향을 벼 단작과 비교하였다. 겨울철 청보리, 호밀, 이탈리아라이글라스 (IRG) 재배지에서 SOC 함량을 벼 단작지와 비교한 결과, 벼+IRG 재배지의 SOC 함량이 19% 높아졌다. 토양의 용적밀도는 SOC 함량과 부의 상관관계에 있

었고, 벼+IRG 재배와 벼 단작의 화학적 특성 간에는 뚜렷한 차이는 없었다. 그리고 벼+IRG 재배는 탄소저장량이 벼 단작에 비해 11.3% 높았다. 겨울철 논토양에 이탈리아라이글라스 (IRG) 재배는 토양유기물을 증진할 수 있는 유용한 토양관리방법이라 볼 수 있겠다.

References

- Balesdent, J., C. Chenu, and M. Balabane. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Till. Res.* 53:215-230.
- Bohn, H., B. McNeal, and G. O'Connor. 1985. *Soil Chemistry*, second ed. John Wiley & Sons, New York.
- Bongiovanni, M.D. and J.C. Lobartini. 2006. Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro- and microaggregates as affected by cultivation. *Geoderma* 136: 660-665.
- Carpenter, S.R., N.F. Caraco, D.L. Correll, R.W. Howarth, A.N. Sharpley, and V.H. Smith. 1998. Nonpoint pollution of surfacewaters with phosphorus and nitrogen. *Ecol. Appl.* 8: 559-568.
- Cookson, P. 1999. Special variation in soil urease activity around irrigated date palms. *Arid Soil Res. Rehab.* 13:155-169.
- Dean, L.A. 1949. Fixation of soil phosphorus. *Adv. Agron.* 1: 391-411.
- Dampney, P.M.R., 1985. A trial to determine the lime requirement for reseeded grassland on a peaty hill soil. *Soil Use Manage.* 1: 95-100.
- Fixen, P.E., A.E. Ludwick, and R.S. Olsen. 1983. Phosphorus and potassium fertilization of irrigated alfalfa on calcareous soils: II Soil phosphorus solubility relationships. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:112-117.
- Haque, M.M., S.Y. Kim, P. Pramanik, G.Y. Kim, and P.J. Kim, 2013. Optimum application level of winter cover crop biomass as green manure under considering methane emission and rice productivity in paddy soil. *Biol. Fertil. Soils.* 49:487-493.
- Jenkinson, D.S., P.B.S. Hart, J.H. Rayner, and L.C. Parry. 1987. Modelling the turnover of organic matter in longterm experiments at Rothamsted. *INTECOL Bullerin* 15:1-8.
- Kim, S.Y., C.H. Lee, J. Gutierrez, and P.J. Kim. 2013. Contribution of winter cover crop amendment on global warming potential

- in rice paddy soil during cultivation. *Plant Soil*. 366:273-286.
- Kim, S.Y., C.K. Park, H.S. Gwon, M.I. Khan, and P.J. Kim. 2015. Optimizing the harvesting stage of rye as a green manure to maximize nutrient production and to minimize methane production in mono-rice paddies. *Sci. Total Environ*. 537:441-446.
- Lee, C.H., C.O. Hong, S.Y. Kim, T. Schumacher, and P.J. Kim. 2011. Reduction of phosphorus release by liming from temporary flooded rice rotational system in greenhouse upland soil. *Ecol. Eng.* 37(8):1239-1243.
- Lee, C.H., C.Y. Park, K.D. Park, W.T. Jeon, and P.J. Kim. 2004. Long-term effects of fertilization on the forms and availability of soil phosphorus in rice paddy. *Chemosphere*. 56:299-304.
- Lee, S.B., C.H. Lee, K.Y. Jung, K.D. Park, D.K. Lee, and P.J. Kim. 2009. Changes of soil organic carbon and its fractions in relation to soil physical properties in a long-term fertilized paddy. *Soil Tillage Res.* 104:227-232.
- Lee, C.H., D.K. Lee, M.A. Ali, and P.J. Kim. 2008. Effects of oyster shell on soil chemical and biological properties and cabbage productivity as a liming materials. *Waste Manage.* 28: 2702-2708.
- Luyssaert, S., E.D. Schulze, A. Börner, A. Knohl, D. Hessenmoller, B.E. Law, P. Ciais, and J. Grace. 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*. 455:213-215.
- Nicholson, F.A., B.J. Chambers, and K.A. Smith. 1996. Nutrient composition of poultry manures in England and Wales. *Bioresour. Technol.* 58:279-84.
- Oades J.M. 1984. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management. *Plant Soil*. 76: 319-337.
- Palm, C.A., R.J.K. Myers, and S.M. Nandwa, 1997. Combined use of organic and inorganic nutrient sources for soil fertility maintenance and replenishment. In: Buresh R.J., Sanchez, P.A., Calhoun, F.E. (Eds.), *Replenishing Soil Fertility in Africa*. SSSA Special Publication, vol. 51. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 193-218.
- Saffigna, P.G., D.S. Powlson, P.C. Brookes, and G.A. Thomas. 1989. Influence of sorghum residues and tillage on soil organic matter and soil microbial biomass in an Australian vertisol. *Soil. Bio. Biochem.* 21(6):759-763.
- Sanchez, P., C.A. Palm, L.T. Szott, E. Cuevas, and R. Lal, 1989. Organic input management in tropical agroecosystems. In: Coleman, D., Bohlool, B., Uehara, G. (Eds.), *Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems*. University of Hawaii Press, Honolulu, pp. 125-152.
- Senesi, N. and E. Loffredo, 1999. The chemistry of soil organic matter. In: Spark, D.L. (Ed.), *Soil Physical Chemistry*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 239-370.
- Schjonning, P. and B.T. Christensen. 1994. Physical and chemical properties of a sandy loam receiving animal manure, mineral fertilizer or no fertilizer for 90 years. *Eur. J. Soil Sic.* 45:257-268.
- Sims, J.T., R.R. Simard, and B.C. Joern. 1998. Phosphorus loss in agricultural drainage: historical perspective and current research. *J. Environ. Qual.* 27:277-293.
- Smith, C.W., A. Hadas, J. Dan, and H. Koyumdjisky. 1985. Shrinkage and atterberg limits in relation to other properties of principal soil types in Israel. *Geoderma*. 35:47-65.
- Stout, W.L., A.N. Sharpley, and J. Landa. 2000. Effectiveness of coal combustion by products in controlling phosphorus export from soils. *J. Environ. Qual.* 29, 352:1239-1244.
- Tang, C., Z. Rengel, E. Diatloff, and C. Gazey. 2003. Responses of wheat and barley to liming on a sandy soil with subsoil acidity. *Field Crops Res.* 80:235-244.
- Tate, R.L. 2000. *Soil Microbiology*, second ed. Wiley, New York, NY.
- Tisdall, J.M. and J.M. Oades, 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J Soil Sci.* 33:141-163.
- Yang, C.H., B.S. Kim, W.K. Park, D.B. Lee, C.H. Yoo, J.D. Kim, and K.Y. Jeong. 2007. Effect of barley straw application on soil properties, rice yield and plowable stress with plowing methods and irrigation rates in barley-rice double cropping system. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(3):201-207.